

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-272555
 (43)Date of publication of application : 05.10.2001

(51)Int.Cl.

G02B 6/12

(21)Application number : 2000-084869

(71)Applicant : KANSAI TLO KK
TDK CORP

(22)Date of filing : 24.03.2000

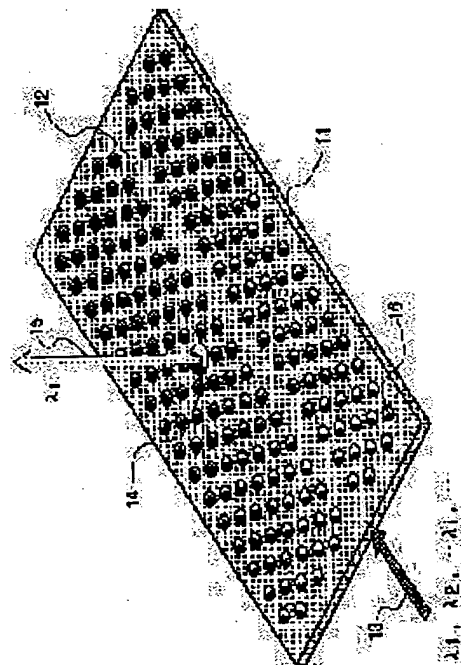
(72)Inventor : NODA SUSUMU
CHUTEINAN ARONKAAN
MIYAUCHI DAISUKE
NARUMIYA YOSHIKAZU

BEST AVAILABLE COPY

(54) TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDE AND WAVELENGTH BRANCHING DEVICE**(57)Abstract:**

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an effective form for forming opto-electromagnetic wave waveguides and an opto-electromagnetic wave multiplexer/demultiplexer for introducing or inputting the opto-electromagnetic waves propagating in two-dimensional photonic crystal waveguides to a plane perpendicular direction.

SOLUTION: The two-dimensional photonic crystal waveguide has the photonic crystal waveguides which have a two-dimensional photonic crystal structure formed with a refractive index distribution by periodically arraying materials having the refractive index lower than the refractive index of a slab 11 formed of a material having the refractive index higher than the refractive index of air on the slab material and are formed with wire-shaped defects 12 in the periodic array of the photonic crystals and in which the wire-shaped defects 12 function as the waveguides. The two-dimensional photonic crystal waveguide has at least one dotted defects 4 which disturb the periodic array of the photonic crystals adjacently to the photonic crystal waveguides. The dotted defects 14 function as opto-electromagnetic wave taking-out/ introducing port for capturing and radiating the opto-electromagnetic waves of specific wavelengths among the opto-electromagnetic waves propagating in the waveguides or capturing the opto-electromagnetic waves of the specific wavelengths from the outside and introducing the same into the waveguides.

**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination] 12.09.2002
 [Date of sending the examiner's decision of rejection] 15.06.2004

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

*** NOTICES ***

JPO and NCIPI are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1] It has the two-dimensional photograph nick crystal structure which arranged periodically the matter with a refractive index lower than this slab ingredient in the slab currently formed from the ingredient with a refractive index higher than air, and formed refractive-index distribution in it. The linear defect is formed in the periodic array of said photograph nick crystal, and this line defect has the photograph nick crystal waveguide which functions as waveguide, and adjoins said photograph nick crystal waveguide. In the light and the electromagnetic wave on which it has at least one punctiform defect which disturbs the periodic array of said photograph nick crystal, and this punctiform defect spreads the inside of waveguide Two-dimensional photograph nick crystal waveguide which functions as the light and the electromagnetic wave ejection / an inlet which captures the light and the electromagnetic wave of specific wavelength, and emits this, or captures the light and the electromagnetic wave of the specific wavelength from the outside, and is introduced in said waveguide.

[Claim 2] Said light and electromagnetic wave ejection / inlet are the two-dimensional photograph nick crystal waveguide of claim 1 which emits / introduces the light and the electromagnetic wave of the direction which intersects perpendicularly with a slab side.

[Claim 3] Said punctiform defect is the two-dimensional photograph nick crystal waveguide of claim 1 from which the wavelength of the light and the electromagnetic wave emitted / introduced with the configuration differs.

[Claim 4] One two-dimensional photograph nick crystal waveguide of claims 1-3 with which a low refractive-index ingredient is filled up into the hole of the shape of a cylinder which the array of said low refractive-index matter formed in slab.

[Claim 5] One two-dimensional photograph nick crystal waveguide of claims 1-4 whose arrays of said low refractive-index matter are triangular lattices.

[Claim 6] Said punctiform defect is one two-dimensional photograph nick crystal waveguide of claims 1-5 which have the configuration of vertical asymmetry to a slab side.

[Claim 7] One two-dimensional photograph nick crystal waveguide of claims 1-6 whose refractive indexes of said slab ingredient are 2.0 or more.

[Claim 8] Said slab ingredient is the two-dimensional photograph nick crystal waveguide of whether it is an inorganic material containing any one sort of In, Ga, aluminum, Sb, As, germanium, Si, P, N, and the O, or two sorts or more, and claim 7 which is an organic material.

[Claim 9] The matter with said low refractive index is one two-dimensional photograph nick crystal waveguide of claims 1-8 which are air [claim 10]. The photograph nick crystal wavelength splitter which has the two-dimensional photograph nick crystal waveguide of claims 1-9.

[Claim 11] The photograph nick crystal wavelength splitter of claim 10 with which the frequencies which have two or more punctiform defects, and this punctiform defect emits / captures differ, respectively.

[Claim 12] The photograph nick crystal wavelength splitter of claims 10 or 11 with which the optical fiber is arranged near the punctiform defect.

[Claim 13] The photograph nick crystal wavelength splitter of claims 10 or 11 with which the semiconductor device which has a photo-electric-conversion function is arranged near [said] the punctiform defect.

*** NOTICES ***

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the waveguide which has the light and the electromagnetic wave ejection / inlet formed by installation of a line defect and a point defect, and a wavelength splitter about the photograph nick crystal used as a minute optical circuit element, especially the two-dimensional photograph nick crystal which has two-dimensional periodic refractive-index distribution.

[0002]

[Description of the Prior Art] The importance of spectral separation / multiplexing machine or a wavelength filter is increasing with progress of a wave-length-multiple-telecommunication system in recent years.

[0003] The optical branching insertion equipment for wave-length multiple telecommunication is also called an optical ADODOROPPU multiplexer, and takes out the signal of a certain channel from the multiplexed signal, or has the function added to a vacant part. As a general configuration, there are an array waveguide diffraction skeleton pattern, a fiber grating mold, etc. The inclination of the wave front which is a kind of diffraction grating with the structure where much optical waveguides from which the length differs were arranged, and is dependent on wavelength with the difference of the die length of this waveguide occurs, and an array waveguide diffraction grating will be separated spectrally and outputted from different waveguide for every wavelength, if wavelength multiplexing light is inputted (for example, the institute-of-telecommunications-engineers magazine p746 -749 (1999)). In a fiber grating mold, it becomes possible by carrying out Bragg reflection only of the signal of specific wavelength by the fiber grating to take out from a drop port or to input from an ADDO port.

[0004] However, in order to lessen bending loss, it will be necessary to enlarge radius of curvature considerably, and in the wavelength multi/demultiplexer of the conventional array waveguide diffraction-grating mold, a component dimension will become very large.

[0005] Then, many ideas of forming the optical multiplexer/demultiplexer of a minima type using a photograph nick crystal are also proposed. For example, it is indicated by Applied Physics Letters, Vol.75, P3739-3741 (1999) (conventional technique 1), Physical Review Letters, Vol.80, P960-963 (1998) (conventional technique 2), etc.

[0006] A photograph nick crystal is a crystal which has periodic refractive-index distribution in the interior, and the new optical property by artificial period structure can be realized.

[0007] a photograph nick crystal -- **** -- the important description has existence of a photograph nick band gap. As the photograph nick crystal (following three-dimension photograph nick crystal) which has a three-dimension period, the perfect band gap to which propagation of light is forbidden to all directions can be formed. a light local by this -- shutting up -- control of ** and spontaneous emission light, and a line -- formation of the waveguide by installation of **** is attained and implementation of a microscopic small optical circuit can be expected.

[0008] Although it is suggested to the conventional technique 1 that a micro optical separator can be formed by making into a branching configuration waveguide which introduced and formed the line defect in the three-dimension photograph nick crystal, it is not indicated about the concrete structure.

[0009] The analysis result of the splitter with which examination of a photograph nick crystal (following two-dimensional photograph nick crystal) which has two-dimensional period structure is briskly performed from production being comparatively easy, and used the waveguide of a branching configuration for the conventional

technique 2 on the other hand is shown.

[0010] The refractive-index period structure of a two-dimensional photograph nick crystal arranges a cylinder hole a tetragonal lattice or in the shape of a triangular grid into a high refractive-index ingredient. Or it forms into a low refractive-index ingredient by arranging the cylinder of a high refractive-index ingredient in the shape of a tetragonal lattice. A photograph nick band gap is formed from such periodic structures, and propagation of light is controlled to the field intrinsic light. waveguide can be formed by introducing a linear defect into this periodic structure (Physical Review Letters, Vol.77, and p3787-3790 (1996) -- and (conventional technique 2)). [for example,]

[0011] The conventional technique 2 is the configuration where the cylinder which consists of a high refraction ingredient was arranged in the shape of a tetragonal lattice. However, although propagation of the light to field inboard is controllable by the band gap as mentioned above, since propagation of the light to the vertical direction is uncontrollable by periodic structure, it assumes that height is infinite and analysis of straight-line waveguide and 90-degree bending, and a branching configuration is performed.

[0012] However, since height cannot be made infinite in an actual device, it is necessary to shut up light in the height of finite.

[0013] On the other hand, when forming a cylinder hole in a high refractive-index ingredient, a high refractive-index ingredient is made into a slab configuration, a low refractive-index layer is prepared up and down, light is shut up by total reflection, and waveguide can be formed.

[0014] However, examination of the splitter in such structure, a multiplexing machine, etc. is not made. Moreover, the light spread to field inboard is drawn in the field direct direction, or the examination about 90-degree bending of leading the light from field direct to field inboard, and a branching configuration is not made, either.

[0015] Although the optical spectral separation and the multiplexing machine using the super prism by the self-cloning mold three-dimension crystal are also examined (for example, Applied Physics Letters, Vol74, P1212-1214 (1999), O pIus E, the December issue, p1560-1565 (1999)), it was not combined with waveguide and examined by only the function as an independent device.

[0016] If it becomes possible from photograph nick crystal waveguide to input light into photograph nick crystal waveguide with wavelength selection nature or it outputs light with wavelength selection nature in a certain wavelength band, the optical circuit which has optical spectral separation very smaller than the usual component and a multiplexing function will become realizable. Moreover, if the light and the electromagnetic wave of two-dimensional photograph nick crystal waveguide can be drawn in the field direct direction, it can also consider as three-dimensional light and electromagnetic wave circuit.

[0017]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] The purpose of this invention draws the light and the electromagnetic wave which spreads the inside of two-dimensional photograph nick crystal waveguide in the field direct direction, or it is the gestalt to input and it is offering the effective gestalt for forming light and electromagnetic wave waveguide, and light and an electromagnetic wave multi/demultiplexer.

[0018]

[Means for Solving the Problem] The above-mentioned purpose is attained by the following configurations.

(1) In the slab currently formed from the ingredient with a refractive index higher than air It has the two-dimensional photograph nick crystal structure which arranged periodically the matter with a refractive index lower than this slab ingredient, and formed refractive-index distribution. The linear defect is formed in the periodic array of said photograph nick crystal, and this line defect has the photograph nick crystal waveguide which functions as waveguide, and adjoins said photograph nick crystal waveguide. In the light and the electromagnetic wave on which it has at least one punctiform defect which disturbs the periodic array of said photograph nick crystal, and this punctiform defect spreads the inside of waveguide Two-dimensional photograph nick crystal waveguide which functions as the light and the electromagnetic wave ejection / an inlet which captures the light and the electromagnetic wave of specific wavelength, and emits this, or captures the light and the electromagnetic wave of the specific wavelength from the outside, and is introduced in said waveguide.

(2) Said light and electromagnetic wave ejection / inlet are the two-dimensional photograph nick crystal waveguide of the above (1) which emits / introduces the light and the electromagnetic wave of the direction

which intersects perpendicularly with a slab side.

(3) Said punctiform defect is the two-dimensional photograph nick crystal waveguide of the above (1) from which the wavelength of the light and the electromagnetic wave emitted / introduced with the configuration differs.

(4) One two-dimensional photograph nick crystal waveguide of above-mentioned (1) - (3) with which a low refractive-index ingredient is filled up into the hole of the shape of a cylinder which the array of said low refractive-index matter formed in slab.

(5) One two-dimensional photograph nick crystal waveguide of above-mentioned (1) - (4) whose arrays of said low refractive-index matter are triangular lattices.

(6) Said punctiform defect is one two-dimensional photograph nick crystal waveguide of vertical above-mentioned [which has an unsymmetrical configuration] (1) - (5) to a slab side.

(7) One two-dimensional photograph nick crystal waveguide of above-mentioned (1) - (6) whose refractive indexes of said slab ingredient are 2.0 or more.

(8) Said slab ingredient is the two-dimensional photograph nick crystal waveguide of whether it is an inorganic material containing any one sort of In, Ga, aluminum, Sb, As, germanium, Si, P, N, and the O, or two sorts or more, and the above (7) which is an organic material.

(9) The matter with said low refractive index is one two-dimensional photograph nick crystal waveguide of above-mentioned (1) - (8) which is air (10). The above (1) Photograph nick crystal wavelength splitter which has the two-dimensional photograph nick crystal waveguide of - (9).

(11) The photograph nick crystal wavelength splitter of the above (10) with which the frequencies which have two or more punctiform defects, and this punctiform defect emits / captures differ, respectively.

(12) The above (10) or (11) photograph nick crystal wavelength splitters with which the optical fiber is arranged near the punctiform defect.

(13) The above (10) or (11) photograph nick crystal wavelength splitters with which the semiconductor device which has a photo-electric-conversion function is arranged near [said] the punctiform defect.

[0019]

[Embodiment of the Invention] The two-dimensional photograph nick crystal waveguide of this invention in the slab currently formed from the ingredient with a refractive index higher than air It has the two-dimensional photograph nick crystal structure which arranged periodically the matter with a refractive index lower than this slab ingredient, and formed refractive-index distribution. The linear defect is formed in the periodic array of said photograph nick crystal, and this line defect has the photograph nick crystal waveguide which functions as waveguide, and adjoins said photograph nick crystal waveguide. In the light and the electromagnetic wave on which it has at least one punctiform defect which disturbs the periodic array of said photograph nick crystal, and this punctiform defect spreads the inside of waveguide It functions as the light and the electromagnetic wave ejection / an inlet which captures the light and the electromagnetic wave of specific wavelength, and emits this, or captures the light and the electromagnetic wave of the specific wavelength from the outside, and is introduced in said waveguide.

[0020] The waveguide and the point defect in this invention can spread not only light but the electromagnetic wave which has a property near light, and can be outputted and inputted.

[0021] Thus, by forming a punctiform defect near the waveguide formed of the linear defect, the light and electromagnetic wave ejection / installation from a punctiform defect are attained, and light and electromagnetic wave ejection / inlet can be formed. This punctiform defect disturbs the two-dimensional photograph nick crystal structure which arranged periodically the matter with a refractive index lower than this slab ingredient in the slab currently formed from the ingredient with a refractive index higher than air, and formed refractive-index distribution in it.

[0022] Hereafter, the gestalt of operation of this invention is explained according to a drawing. As the 1st gestalt of this invention, a two-dimensional photograph nick crystal slab waveguide is adjoined, a point defect is prepared in drawing 1 , and the waveguide and the wavelength splitter which outputs the light and the electromagnetic wave of specific wavelength in the field direct direction are shown.

[0023] A photograph nick crystal and waveguide are described first. The photograph nick crystal used for this invention is a two-dimensional photograph nick crystal which has a band gap in field inboard according to two-dimensional refractive-index period distribution, and a crystal structure arranges the cylinder hole 16 in the

shape of a triangular grid into the slab ingredient 11, as shown in drawing 1 .

[0024] Within a crystal, in field inboard, propagation is forbidden to incident light and an electromagnetic wave 13 (λ_1 , λ_2 , $-\lambda_1$, $-\lambda_2$) by the band gap, and it is shut up in the field direct direction by the total reflection by the up-and-down low refractive-index ingredient.

[0025] Here, as shown in drawing 1 , the linear defect 12 will be introduced into a photonic crystal by sampling in part the cylinder hole 16 arranged in the shape of a triangular grid to a line. Trapped mode **** in this line defect 12, and waveguide is formed.

[0026] Although an ingredient with a large refractive index is desirable and InGaAsP slab is used by this example as an ingredient of photonic crystal slab structure since it is necessary to shut up light and an electromagnetic wave in the vertical direction. An organic material etc. can be used for inorganic materials, such as an ingredient which contains any one sort of GaAs, or In, Ga, aluminum, Sb, As, germanium, Si, P, N and O, or two sorts or more in others, and Si, especially an inorganic semiconductor material, and a pan.

[0027] The larger one as mentioned above is desirable, it is size, 2.0 or more are specifically more desirable than air, and with [the refractive index of the ingredient used as slab] 3.0 [or more], it is more desirable.

[0028] In addition, in the above-mentioned example, as shown, for example in drawing 3 , the cylinder hole 16 is arranged in the shape of triangular grid 16a, but as shown, for example in drawing 4 , the cylinder hole 16 can be arranged in the shape of tetragonal lattice 16b so that a photonic band gap may exist, and the photonic crystal which introduced the defect 12 into the line can also be used. in addition, some slab with which drawing 3 and 4 constitute a photonic crystal -- it is a top view.

[0029] Next, light and electromagnetic wave ejection / inlet is explained. As mentioned above, light and an electromagnetic wave can spread the inside of the defective waveguide of a two-dimensional photonic crystal. In straight-line waveguide, the wavelength region which can spread light and an electromagnetic wave by low loss is comparatively large. Therefore, the light and the electromagnetic wave of the wavelength band containing the wavelength of several channels can be made to spread in waveguide. On the other hand, while the light and the electromagnetic wave of specific wavelength will be captured here and resonating inside a defect if a point defect 14 is established near the waveguide as shown in drawing 1 , light and an electromagnetic wave 15 are emitted in the small vertical direction of the Q factor resulting from being a slab configuration.

[0030] Moreover, it can be made to function as the splitter which takes out the light and the electromagnetic wave of light and electromagnetic wave ejection / not only inlet but specific wavelength (λ_1), a multiplexing machine, or a filter by designing a point defect so that only the wavelength of the specific channel in a wavelength band may be captured. Moreover, according to this gestalt, the guided wave light within a field and an electromagnetic wave can be drawn in the field direct direction, and a fork road and a turn way can be formed in a very small field. Moreover, it is also possible to draw the light and the electromagnetic wave of the specific wavelength which carried out incidence in the field direct direction on the contrary at the waveguide within a field.

[0031] By setting up spacing of waveguide and ***** suitably, it is also possible to control the rate of the light and the electromagnetic wave of the specific wavelength captured and outputted. For this reason, light and an electromagnetic wave can be taken out at a predetermined rate, or the light and the electromagnetic wave circuit to branch can also be formed easily.

[0032] moreover, the thing for which vertical asymmetry is introduced into a defect although light and an electromagnetic wave are outputted in the vertical direction since vertical asymmetry is not introduced into a defect especially in the gestalt of drawing 1 -- the upper and lower sides -- it is possible to also make light and an electromagnetic wave output only to either. The approach of making the configuration of a point defect 14 into the shape of a cone as an asymmetric introductory approach since cylindrical as shown, for example in drawing 5 , or changing the path of a point defect 14 by the upper and lower sides of slab 11 as shown in drawing 6 can be used. drawing 5 and 6 -- a part of point defect part -- it is a sectional view. [in addition,]

[0033] The gestalt which adjoined straight-line waveguide and formed two point defects 21 and 22 in drawing 2 as 2nd operation gestalt of this invention is shown. It is the gestalt which controlled the wavelength of the light and the electromagnetic waves 22 and 23 captured and outputted with the magnitude of each defect, and two waves (λ_1 and λ_2) of the band of the light and the electromagnetic wave (λ_1 , λ_2 , $-\lambda_1$, $-\lambda_2$) inputted from each point defect can be outputted. The light and electromagnetic waves

other than **** and the outputted wavelength guide the inside of straight-line waveguide. Moreover, although considered as the wavelength splitter of two channels in this example, multi-channel-izing more is also possible by increasing the number of defects.

[0034] Drawing 7 shows the concept of a multi/demultiplexer which is the gestalt of operation of the 3rd of this invention. The light and the electromagnetic wave 31 of a certain wavelength band spread the inside of photograph nick crystal waveguide, is captured according to point defects 32-34, and is outputted in the field direct direction.

[0035] This light and electromagnetic wave are incorporated on the light and the electromagnetic wave fibers 35-37 arranged on the point defect, and it uses as a signal. As for light and an electromagnetic wave fiber, at this time, it is desirable to set the gap of extent which does not disturb the photograph nick crystal structure, and to be arranged on a point defect.

[0036] Or as shown in drawing 8, it can also integrate with the semiconductor device 45-47 which has a photo-electric-conversion function, for example, photodiode arrays. Thereby, the light and the electromagnetic wave outputted in the field direct direction are convertible for a direct electrical signal within a very small area from point defects 42-44.

[0037] Below, the production approach of of the photograph nick crystal waveguide and the wavelength splitter of the operation gestalt of this invention is described.

[0038] First, as shown in drawing 9, crystal growth of the InGaAsP layer 53 is carried out on the InP substrate 51 preferably [as the InP layer 52 and a high refractive-index slab ingredient] as a buffer layer. Crystal growth is preferably performed at 590-650 degrees C by the MOCVD method.

[0039] Then, as shown in drawing 10, in order to form a triangular grid-like circular hole and the pattern of a point defect, the photoresist 54 for electron beam lithography is applied, as shown in drawing 11, exposure and development are performed and patterning of the resist is carried out. The lattice constant of a photograph nick crystal is 0.5 micrometers also when the wavelength of an infrared region is assumed as propagation light and an electromagnetic wave. Below, extent and since it is very small, drawing by the electron ray is performed here.

[0040] Next, as shown in drawing 12, a cylinder hole and a defect are formed in InGaAsP slab by RIE (Reactive Ion Etching) by using a resist as a mask. In RIE, it is H₂. CH₄ Mixed gas is used.

[0041] Next, as shown in drawing 13, in order to make the slab upper and lower sides into the air space of a low refractive index after resist removal, InGaAsP slab is membrane-ized as shown in drawing 14. Wet etching of this is carried out and it is performed so that only an InP layer may be etched alternatively.

[0042] Although InGaAsP was used as a high refractive-index slab ingredient in the above-mentioned example, since the refractive index of Si is high and processing by my chroma C NINGU is possible for it, it is a useful ingredient. The production approach at the time of using Si for below as a slab ingredient is described.

[0043] First, a SOI substrate is prepared as shown in drawing 15. A SOI substrate is SiO₂ on the Si substrate 61 used as the base. It is the substrate with which the laminating of the single crystal Si layer 63 is carried out through the layer 62. Moreover, it changes to this and is SiO₂ on Si substrate. It is also possible to use the substrate into which the layer and Si layer were grown up. Next, as shown in drawing 16, the photoresist 64 for electron beam lithography is applied to the SOI substrate 61, as shown in drawing 17, exposure and development are performed and patterning of the resist is carried out.

[0044] Then, as shown in drawing 18, a cylinder hole and a defect are formed in the Si layer 63 by RIE by using a resist 64 as a mask. In RIE, it is SF₆. Gas is used. Subsequently, as shown in drawing 19, after removing a resist, as shown in drawing 20, the oxide film layer under a photograph nick crystal is etched with HF water solution, and it membrane-izes.

[0045]

[Example] Hereafter, a property is shown about the example of this invention. First, it describes about a photograph nick crystal. 0.29a and thickness t of slab set the radius r of a hole to 0.6a, having used the lattice constant of a photograph nick crystal as a, as photograph nick crystal slab was constituted from InGaAsP, for example, it was shown in drawing 21 $R > 1$.

[0046] On the other hand, about the case where a line defect and a point defect are established, it analyzed by the time domain finite difference method (Finite Difference Time Domain:FDTD), and the result shown below was obtained. In addition, the method of a maxwell is the approach of solving directly the rotation equation for

which it depends on time amount among equations, and when a time domain finite difference method is explained briefly, it is as follows.

[0047] In an isotropic medium, an equation is written as follows like the method of a maxwell.

[0048]

[Equation 1]

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = +\epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

[0049] Here, mu is [a dielectric constant and C of permeability and E] conductivity. If these formulas are difference-ized, the following six formulas will be obtained.

[0050]

[Equation 2]

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) = H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\mu\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right)} \left[\frac{E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k+1\right) - E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} + \frac{E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j+1, k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right] \quad (1)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) = H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right)} \left[\frac{E_z^n\left(i+1, j, k+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta x} + \frac{E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k+1\right)}{\Delta z} \right] \quad (2)$$

[0051]

[Equation 3]

$$\begin{aligned}
 & H_z^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \\
 &= H_z^n \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) + \frac{\Delta t}{\mu \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right)} \left[\frac{E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k \right) - E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)}{\Delta y} + \frac{E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) - E_y^n \left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta x} \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

[0052]
[Equation 4]

$$\begin{aligned}
 & E_x^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \\
 &= E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) + \frac{\Delta t}{\epsilon \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)} \left[\frac{H_z^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right)}{\Delta y} + \frac{H_y^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right) - H_y^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta z} \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$E_x^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) = E_x^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) + \frac{\Delta t}{\epsilon\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)} \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} + \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} \right] \quad (5)$$

$$E_z^{n+1}\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) = E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\epsilon\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)} \left[\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta x} + \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right] \quad (6)$$

[0053] Six upper formulas are used and the situation of propagation of the light and the electromagnetic wave in photograph nick crystal slab can be analyzed. The frequency spectrum is called for by observing and carrying out the Fourier transform of the electric field on ***** and a defect.

[0054] First, it describes about the straight-line waveguide except a cylinder hole by one period. As for light and an electromagnetic wave, normalized radian frequency f can spread the inside of waveguide without a loss in the range of 0.27-0.28 [c/a]. It is decided that the wavelength of light and an electromagnetic wave [an electromagnetic wave] to make it spreading a lattice constant a fulfills this condition. this example -- the wavelength of propagation light and an electromagnetic wave -- 1.55 micrometers $f=0.275$ [c/a] which it sets up and is the core of 0.27-0.28 [c/a] -- 1.55 micrometers ** -- carrying out -- a -- 0.275×1.55 micrometer from -- asking -- 0.42625 micrometers ** -- it carried out.

[0055] The frequency of light and an electromagnetic wave and the strong relation which are emitted in the field direct direction from the point defect which adjoined waveguide and was prepared in drawing 22 are shown. In addition, the point defect has changed and established the radius of one cylinder hole, and the radius was set to 0.56. From drawing, it is checked that the light and the electromagnetic wave of normalized radian frequency $f=0.273$ [c/a] emanate in the vertical direction. Moreover, Q value is about 500.

[0056] The frequency and reinforcement of synchrotron orbital radiation and an electromagnetic wave from each point defect in the gestalt shown in drawing 23 at drawing 2, i.e., the gestalt which established the point defect of magnitude which adjoins and is different at straight-line waveguide, are shown. The radius used the point defect in this case as the cylinder hole of 0.56a and 0.58a, respectively. It is checked that the light and the electromagnetic wave of $f=0.2729$ [c/a] and $f=0.2769$ [c/a] are emitted for a frequency, respectively. Moreover, each Q value of a defect is about 500.

[0057] It was checked that the waveguide formed in the two-dimensional photograph nick crystal by installation of a point defect and a line defect has the light and the electromagnetic wave ejection / introductory function from a point defect, and a function as a truing force type wavelength spectral separation / multiplexing machine from these results.

[0058]

[Effect of the Invention] As mentioned above, in spite of being the two-dimensional photograph nick crystal structure, it is possible to output and input light and an electromagnetic wave in the field direct direction, and further, since the light and the electromagnetic wave of specific wavelength can be separated spectrally, outputted and inputted from a point defect, a micro wavelength splitter is realizable in the wavelength splitter which established and formed the point defect near the two-dimensional photograph nick crystal waveguide like this invention. This enables implementation of an again comparatively easy three-dimensional micro light and electromagnetic wave circuit.

[Translation done.]

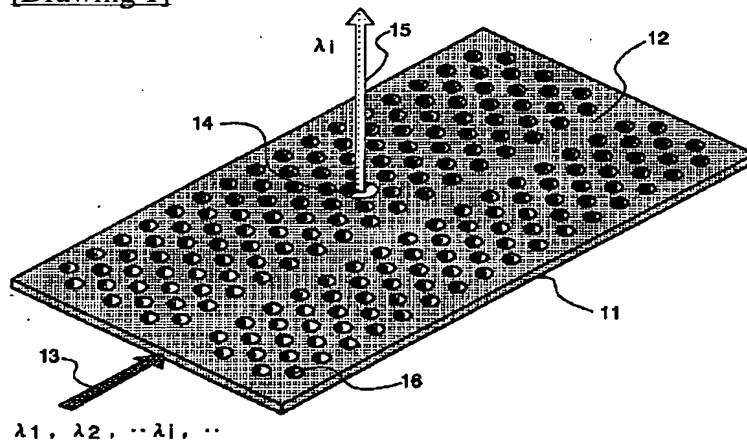
* NOTICES *

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

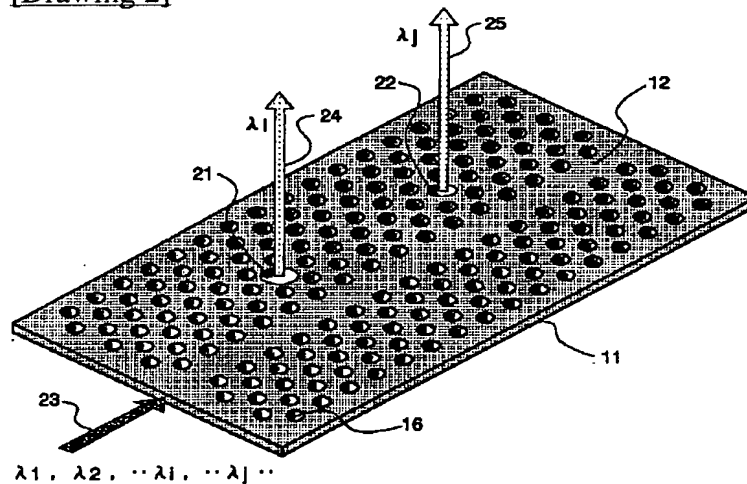
- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DRAWINGS

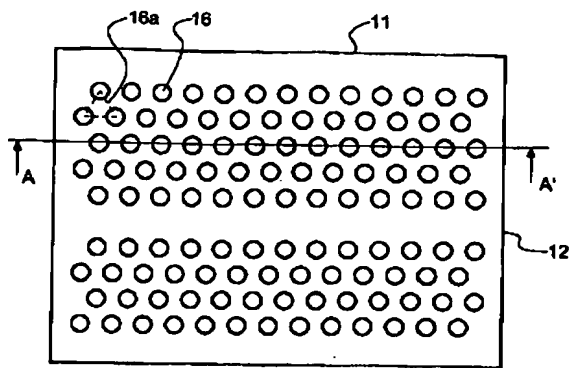
[Drawing 1]



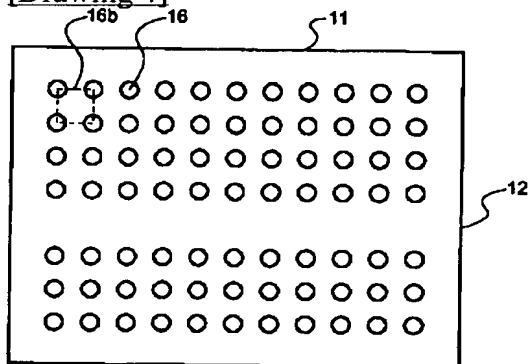
[Drawing 2]



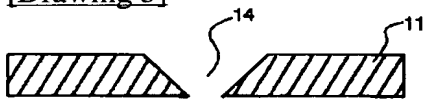
[Drawing 3]



[Drawing 4]



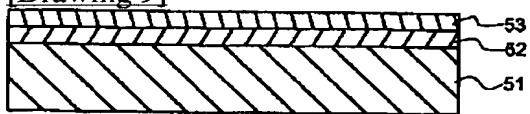
[Drawing 5]



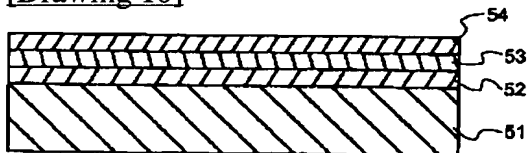
[Drawing 6]



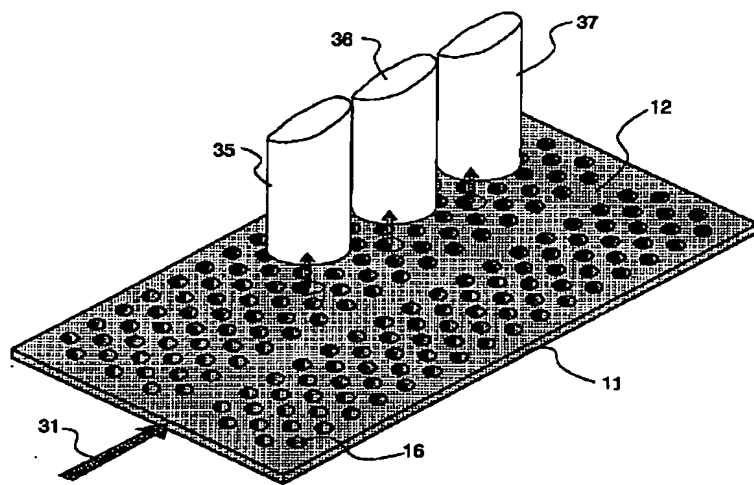
[Drawing 9]



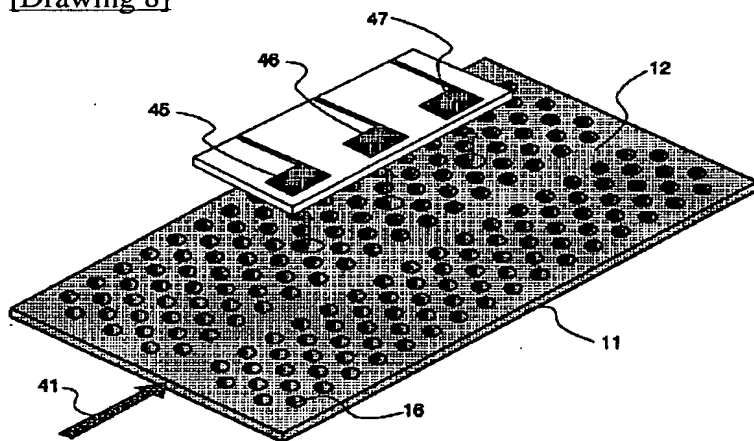
[Drawing 10]



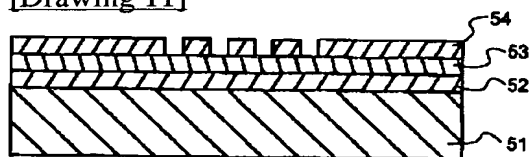
[Drawing 7]



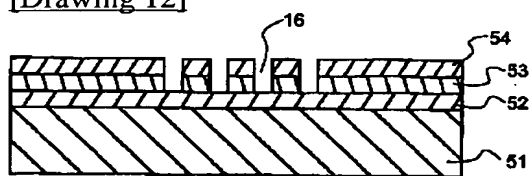
[Drawing 8]



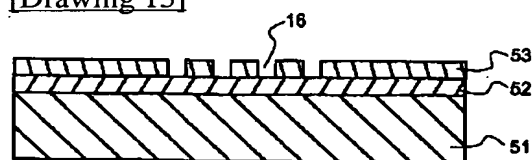
[Drawing 11]



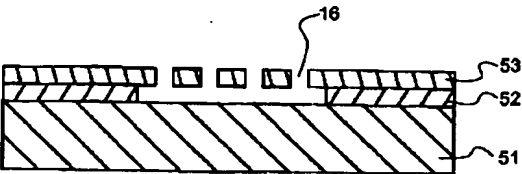
[Drawing 12]



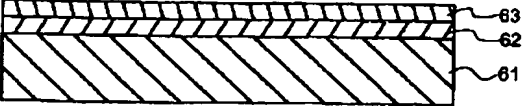
[Drawing 13]



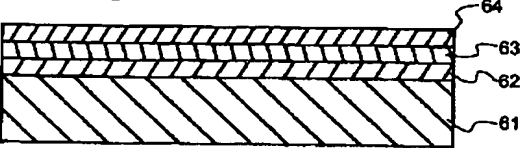
[Drawing 14]



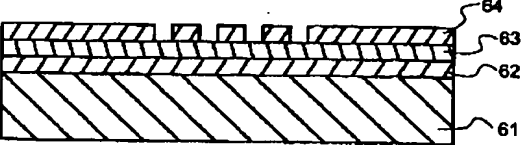
[Drawing 15]



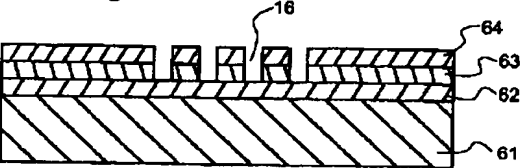
[Drawing 16]



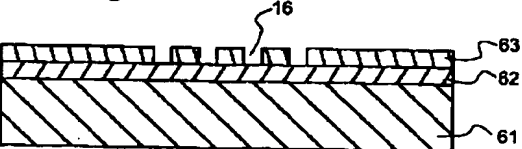
[Drawing 17]



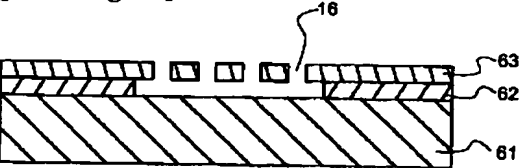
[Drawing 18]



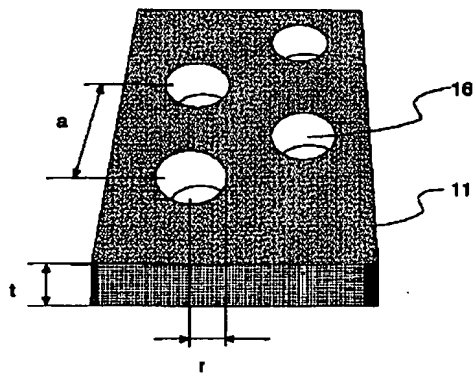
[Drawing 19]



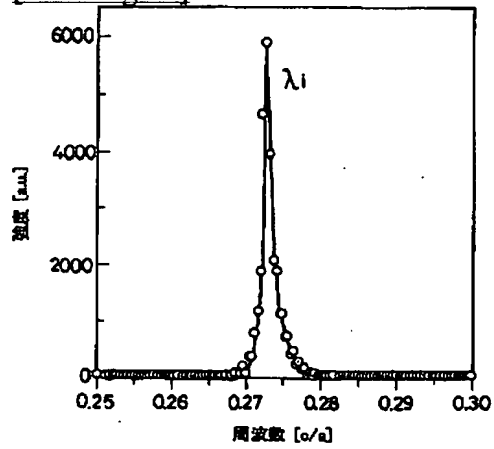
[Drawing 20]



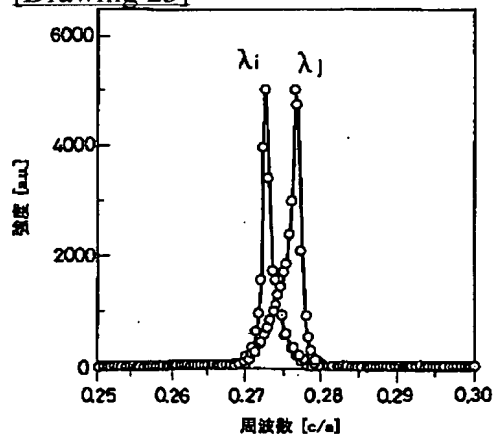
[Drawing 21]



[Drawing 22]



[Drawing 23]



[Translation done.]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-272555

(P2001-272555A)

(43) 公開日 平成13年10月5日 (2001.10.5)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 2 B 6/12

識別記号

F I

G 0 2 B 6/12

データベース (参考)

F 2 H 0 4 7

N

Z

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2000-84869 (P2000-84869)

(22) 出願日 平成12年3月24日 (2000.3.24)

(71) 出願人 899000046

関西ティー・エル・オー株式会社

京都府京都市下京区中堂寺粟田町1番地

(71) 出願人 000003067

ティーディーケー株式会社

東京都中央区日本橋1丁目13番1号

(72) 発明者 野田 進

京都府宇治市五ヶ庄官有地 京都大学職員

宿舎231

(74) 代理人 100082865

弁理士 石井 陽一

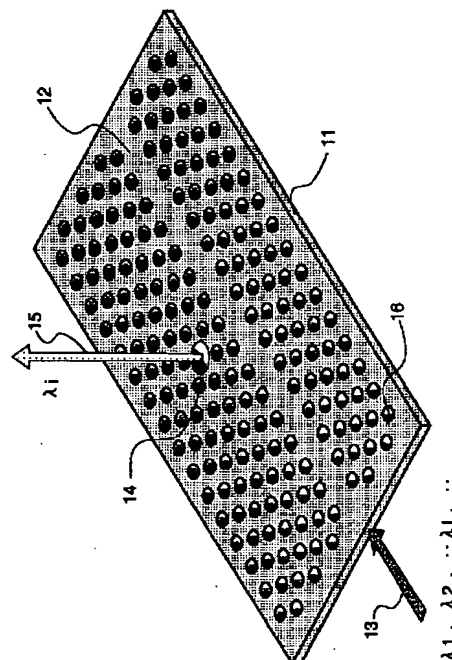
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 2次元フォトリック結晶導波路、および波長分波器

(57) 【要約】

【課題】 2次元フォトリック結晶導波路中を伝搬する光・電磁波を面直方向に導く、あるいは入力する形態で、光・電磁波導波路、光・電磁波合分波器を形成するための効果的形態を提供する。

【解決手段】 空気より屈折率が高い材料から形成されているスラブ11に、このスラブ材料よりも屈折率の低い物質を周期的に配列して屈折率分布を形成した2次元フォトリック結晶構造を有し、前記フォトリック結晶の周期的配列に線状の欠陥12が形成されており、この線状欠陥12が導波路として機能するフォトリック結晶導波路を有し、前記フォトリック結晶導波路に隣接して、前記フォトリック結晶の周期的配列を乱す少なくとも1つの点状の欠陥14を有し、この点状欠陥14が導波路中を伝搬する光・電磁波のなかで、特定の波長の光・電磁波を捕獲してこれを放射し、あるいは外部からの特定の波長の光・電磁波を捕獲して前記導波路内に導入する光・電磁波取り出し／導入口として機能する構造の2次元フォトリック結晶導波路とした。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 空気より屈折率が高い材料から形成されているスラブに、このスラブ材料よりも屈折率の低い物質を周期的に配列して屈折率分布を形成した2次元フォトリック結晶構造を有し、

前記フォトリック結晶の周期的配列に線状の欠陥が形成されており、この線状欠陥が導波路として機能するフォトリック結晶導波路を有し、

前記フォトリック結晶導波路に隣接して、前記フォトリック結晶の周期的配列を乱す少なくとも1つの点状の欠陥を有し、

この点状欠陥が導波路中を伝搬する光・電磁波のなかで、特定の波長の光・電磁波を捕獲してこれを放射し、あるいは外部からの特定の波長の光・電磁波を捕獲して前記導波路内に導入する光・電磁波取り出し／導入口として機能する2次元フォトリック結晶導波路。

【請求項2】 前記光・電磁波取り出し／導入口は、スラブ面と直交する方向の光・電磁波を放射／導入する請求項1の2次元フォトリック結晶導波路。

【請求項3】 前記点状欠陥は、その形状により放射／導入する光・電磁波の波長が異なる請求項1の2次元フォトリック結晶導波路。

【請求項4】 前記低屈折率物質の配列が、スラブに形成した円柱状の孔に低屈折率材料が充填されたものである請求項1～3のいずれかの2次元フォトリック結晶導波路。

【請求項5】 前記低屈折率物質の配列が、三角格子配列である請求項1～4のいずれかの2次元フォトリック結晶導波路。

【請求項6】 前記点状欠陥は、スラブ面に対して上下非対称の形状を有する請求項1～5のいずれかの2次元フォトリック結晶導波路。

【請求項7】 前記スラブ材料の屈折率が、2.0以上である請求項1～6のいずれかの2次元フォトリック結晶導波路。

【請求項8】 前記スラブ材料は、In、Ga、Al、Sb、As、Ge、Si、P、N、およびOのいずれか1種または2種以上を含有する無機材料であるか、有機材料である請求項7の2次元フォトリック結晶導波路。

【請求項9】 前記屈折率の低い物質は空気である請求項1～8のいずれかの2次元フォトリック結晶導波路

【請求項10】 請求項1～9の2次元フォトリック結晶導波路を有するフォトリック結晶波長分波器。

【請求項11】 点状欠陥を複数有し、この点状欠陥が放射／捕獲する周波数がそれぞれ異なっている請求項10のフォトリック結晶波長分波器。

【請求項12】 点状欠陥近傍に光ファイバーが配置されている請求項10または11のフォトリック結晶波長分波器。

【請求項13】 前記点状欠陥近傍に、光電変換機能を

有する半導体素子が配置されている請求項10または11のフォトリック結晶波長分波器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、例えば微小光回路素子として用いられるフォトリック結晶、特に2次元の周期的屈折率分布を有する2次元フォトリック結晶に関し、線状欠陥および点欠陥の導入により形成した、光・電磁波取り出し／導入口を有する導波路、および波長分波器に関する。

【0002】

【従来の技術】近年の波長多重通信システムの進展に伴い、分波・合波器や波長フィルターの重要性が高まっている。

【0003】波長多重通信の光分岐挿入装置は、光アドドロップ多重装置とも呼ばれ、多重化された信号からあるチャンネルの信号を取り出したり、空いている部分に追加する機能を持つ。一般的構成として、アレイ導波路回折格子型、ファイバグレーティング型などがある。アレイ導波路回折格子は、長さの異なる光導波路が多数配列された構造を持つ一種の回折格子で、この導波路の長さの差により波長に依存する波面の傾きが発生し、波長多重光を入力すると波長毎に異なる導波路から分波されて出力される（例えば電気通信学会誌p746-749(1999)）。ファイバグレーティング型では、特定波長の信号のみファイバグレーティングでブラッグ反射させることにより、ドロップポートから取り出す、あるいはアドポートから入力することが可能となる。

【0004】しかし、従来のアレイ導波路回折格子型の波長合分波器では、曲げ損を少なくするため曲率半径をかなり大きくする必要があり、素子寸法が非常に大きくなってしまふ。

【0005】そこで、フォトリック結晶を用いて極小型の光合分波器を形成するという考えも多く提案されている。例えば、Applied Physics Letters, Vol.75, P3739-3741(1999)（従来技術1）、Physical Review Letters, Vol.80, P960-963(1998)（従来技術2）等に記載されている。

【0006】フォトリック結晶とは、その内部に周期的な屈折率分布を持つ結晶であり、人工周期構造による新規な光学特性を実現し得るものである。

【0007】フォトリック結晶が持つ重要な特徴にフォトリックバンドギャップの存在がある。3次元周期を有するフォトリック結晶（以下3次元フォトリック結晶）では、全ての方向に対して光の伝搬が禁じられる完全バンドギャップを形成することができる。これにより、局所的な光の閉じ込めや、自然放出光の制御、線状欠陥の導入による導波路の形成が可能となり、極微小光回路の実現が期待できる。

【0008】従来技術1には、3次元フォトニック結晶に線状欠陥を導入して形成した導波路を分岐形状とすることにより、超小型光分波器を形成できることが示唆されているが、その具体的な構造については開示されていない。

【0009】一方、2次元周期構造を有するフォトニック結晶（以下2次元フォトニック結晶）の検討が、作製が比較的容易なことから盛んに行われており、従来技術2には、分岐形状の導波路を用いた分波器の解析結果が示されている。

【0010】2次元フォトニック結晶の屈折率周期構造は、高屈折率材料に円柱孔を正方格子または三角格子状に配列する。あるいは低屈折率材料中に高屈折率材料の円柱を正方格子状に配列することにより形成する。これらの周期構造からフォトニックバンドギャップが形成され、面内光に対しては光の伝搬が制御される。この周期構造に線状の欠陥を導入することにより導波路を形成することができる（例えば、Physical Review Letters, Vol. 77, p3787-3790(1996)、および（従来技術2））。

【0011】従来技術2は、高屈折率材料からなる円柱を正方格子状に配列した形状である。ただし、前述のように面内方向に対しての光の伝搬はバンドギャップにより制御できるが、上下方向への光の伝搬は周期構造では制御できないので、高さを無限大と想定して、直線導波路および90°の曲げ、分岐形状の解析を行っている。

【0012】しかしながら、実際のデバイスでは高さを無限大とすることはできないので、有限の高さで光を閉じこめる必要がある。

【0013】一方、高屈折率材料に円柱孔を形成する場合は、高屈折率材料をスラブ形状とし、上下に低屈折率層を設けて全反射により光を閉じ込め、導波路を形成することができる。

【0014】しかしながら、このような構造での分波器、合波器等の検討はなされていない。また、面内方向に伝搬する光を面直方向に導く、あるいは面直方向からの光を面内方向に導くといった90°の曲げ、分岐形状に関する検討もなされていない。

【0015】自己クローニング型3次元結晶によるスーパープリズムを用いた光分波、合波器も検討されているが（例えばApplied Physics Letters, Vol. 74, P1212-1214(1999)、Optics Express, Vol. 1, No. 2, p1560-1565(1999)）、導波路と組み合わせられたものではなく、単独のデバイスとしての機能でしか検討されていない。

【0016】フォトニック結晶導波路から、ある波長帯域で波長選択性を持って光を出力する、あるいはフォトニック結晶導波路に波長選択性を持って光を入力することが可能となれば、通常の素子よりも非常に小型な光分波、合波機能を有する光回路が実現可能となる。また、2次元フォトニック結晶導波路の光・電磁波を面直方向に導くことができれば、立体的な光・電磁波回路とする

こともできる。

【0017】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、2次元フォトニック結晶導波路中を伝搬する光・電磁波を面直方向に導く、あるいは入力する形態で、光・電磁波導波路、光・電磁波合分波器を形成するための効果的形態を提供することである。

【0018】

【課題を解決するための手段】上記目的は以下の構成により達成される。

(1) 空気より屈折率が高い材料から形成されているスラブに、このスラブ材料よりも屈折率の低い物質を周期的に配列して屈折率分布を形成した2次元フォトニック結晶構造を有し、前記フォトニック結晶の周期的配列に線状の欠陥が形成されており、この線状欠陥が導波路として機能するフォトニック結晶導波路を有し、前記フォトニック結晶導波路に隣接して、前記フォトニック結晶の周期的配列を乱す少なくとも1つの点状の欠陥を有し、この点状欠陥が導波路中を伝搬する光・電磁波のなかで、特定の波長の光・電磁波を捕獲してこれを放射し、あるいは外部からの特定の波長の光・電磁波を捕獲して前記導波路内に導入する光・電磁波取り出し／導入口として機能する2次元フォトニック結晶導波路。

(2) 前記光・電磁波取り出し／導入口は、スラブ面と直交する方向の光・電磁波を放射／導入する上記(1)の2次元フォトニック結晶導波路。

(3) 前記点状欠陥は、その形状により放射／導入する光・電磁波の波長が異なる上記(1)の2次元フォトニック結晶導波路。

(4) 前記低屈折率物質の配列が、スラブに形成した円柱状の孔に低屈折率材料が充填されたものである上記(1)～(3)のいずれかの2次元フォトニック結晶導波路。

(5) 前記低屈折率物質の配列が、三角格子配列である上記(1)～(4)のいずれかの2次元フォトニック結晶導波路。

(6) 前記点状欠陥は、スラブ面に対して上下非対称の形状を有する上記(1)～(5)のいずれかの2次元フォトニック結晶導波路。

(7) 前記スラブ材料の屈折率が、2.0以上である上記(1)～(6)のいずれかの2次元フォトニック結晶導波路。

(8) 前記スラブ材料は、In、Ga、Al、Sb、As、Ge、Si、P、N、およびOのいずれか1種または2種以上を含有する無機材料であるか、有機材料である上記(7)の2次元フォトニック結晶導波路。

(9) 前記屈折率の低い物質は空気である上記(1)～(8)のいずれかの2次元フォトニック結晶導波路

(10) 上記(1)～(9)の2次元フォトニック結晶導波路を有するフォトニック結晶波長分波器。

(11) 点状欠陥を複数有し、この点状欠陥が放射／捕獲する周波数がそれぞれ異なっている上記(10)のフォトニック結晶波長分波器。

(12) 点状欠陥近傍に光ファイバーが配置されている上記(10)または(11)のフォトニック結晶波長分波器。

(13) 前記点状欠陥近傍に、光電変換機能を有する半導体素子が配置されている上記(10)または(11)のフォトニック結晶波長分波器。

【0019】

【発明の実施の形態】本発明の2次元フォトニック結晶導波路は、空気より屈折率が高い材料から形成されているスラブに、このスラブ材料よりも屈折率の低い物質を周期的に配列して屈折率分布を形成した2次元フォトニック結晶構造を有し、前記フォトニック結晶の周期的配列に線状の欠陥が形成されており、この線状欠陥が導波路として機能するフォトニック結晶導波路を有し、前記フォトニック結晶導波路に隣接して、前記フォトニック結晶の周期的配列を乱す少なくとも1つの点状の欠陥を有し、この点状欠陥が導波路中に伝搬する光・電磁波のなかで、特定の波長の光・電磁波を捕獲してこれを放射し、あるいは外部からの特定の波長の光・電磁波を捕獲して前記導波路内に導入する光・電磁波取り出し／導入口として機能するものである。

【0020】本発明における導波路および点欠陥は、光のみならず光に近い性質を有する電磁波も伝搬し、入出力可能である。

【0021】このように、線状の欠陥により形成された導波路の近傍に点状欠陥を形成することにより、点状の欠陥からの光・電磁波取り出し／導入が可能となり、光・電磁波取り出し／導入口を形成することができる。この、点状の欠陥は、空気より屈折率が高い材料から形成されているスラブに、このスラブ材料よりも屈折率の低い物質を周期的に配列して屈折率分布を形成した2次元フォトニック結晶構造を乱すものである。

【0022】以下、本発明の実施の形態を図面に従って説明する。図1に本発明の第1の形態として、2次元フォトニック結晶スラブ導波路に隣接して点欠陥を設け、特定波長の光・電磁波を面直方向に出力する導波路・波長分波器を示す。

【0023】はじめにフォトニック結晶および導波路に関して記述する。本発明に用いたフォトニック結晶は、2次元の屈折率周期分布により面内方向にバンドギャップを有する2次元フォトニック結晶であり、結晶構造は、例えば図1に示すようにスラブ材料11に円柱孔16を三角格子状に配列したものである。

【0024】入射光・電磁波13(λ_1 , λ_2 , \dots , λ_i , \dots)は、結晶内では、面内方向にはバンドギャップにより伝搬を禁じられ、面直方向には上下の低屈折率材料による全反射により閉じこめられる。

【0025】ここで、図1に示すように、三角格子状に配列した円柱孔16を一部線状に抜き取ることにより、フォトニック結晶に線状の欠陥12が導入されることになる。この線状欠陥12中には導波モードが存存し、導波路が形成される。

【0026】フォトニック結晶スラブ構造の材料としては、上下方向に光・電磁波を閉じこめる必要があるので屈折率が大きい材料が望ましく、本実施例ではInGaAsPスラブを用いているが、他にもGaAsあるいはIn、Ga、Al、Sb、As、Ge、Si、P、N、およびOのいずれか1種または2種以上を含む材料、およびSi等の無機材料、特に無機半導体材料、さらには有機材料などを用いることができる。

【0027】スラブとして用いる材料の屈折率は前述のように大きい方が望ましく、具体的には空気より大であり、2.0以上が好ましく、3.0以上であればより好ましい。

【0028】なお、上記例では、例えば図3に示すように、円柱孔16を三角格子16a状に配列しているが、例えば図4に示すように、フォトニックバンドギャップが存在するように円柱孔16を正方格子16b状に配列し、線状に欠陥12を導入したフォトニック結晶を用いることもできる。なお、図3、4は、フォトニック結晶を構成するスラブの一部平面図である。

【0029】次に、光・電磁波取り出し／導入口について説明する。前述のように、光・電磁波は2次元フォトニック結晶の欠陥導波路内を伝播することができる。直線導波路においては、光・電磁波を低損失で伝搬できる波長域は比較的大きい。したがって、数チャンネルの波長を含む波長帯域の光・電磁波を導波路中に伝搬させることができる。これに対して、図1に示したように、導波路近傍に点欠陥14を設けると、ここに特定波長の光・電磁波が捕獲され、欠陥内部で共振している間に、スラブ形状であることに起因するQ因子の小さな上下方向へ光・電磁波15が放射される。

【0030】また、点欠陥を、波長帯域中の特定チャンネルの波長のみ捕獲するよう設計することによって、光・電磁波取り出し／導入口のみならず特定波長の光・電磁波(λ_i)を取り出す分波器、合波器あるいは濾波器として機能させることができる。また、この形態により、面内導波光・電磁波を面直方向に導くことができ、微少領域で分岐路、方向転換路を形成することができる。また、反対に面直方向に入射した特定波長の光・電磁波を面内導波路に導くことも可能である。

【0031】導波路と点欠陥の間隔を適宜設定することにより、捕獲、出力する特定波長の光・電磁波の割合を制御することも可能である。このため、所定の割合で光・電磁波を取り出したたり、分岐させる光・電磁波回路も容易に形成することができる。

【0032】また、図1の形態においては特に欠陥に上

下非対称性を導入していないので、光・電磁波は上下方向に出力されるが、欠陥に上下非対称性を導入することによって、上下どちらかの方に光・電磁波を出力させることも可能である。非対称性の導入方法としては、例えば図5に示すように点欠陥14の形状を、円柱状から円錐状にしたり、あるいは図6に示すように、点欠陥14の径をスラブ11の上下で変えるという方法を用いることができる。なお、図5、6は点欠陥部分の一部断面図である。

【0033】図2には、本発明の第2の実施形態として、直線導波路に隣接して2つの点欠陥21、22を設けた形態を示す。それぞれの欠陥の大きさにより捕獲、出力する光・電磁波22、23の波長を制御した形態であり、それぞれの点欠陥から入力された光・電磁波($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \lambda_j, \dots$)の帯域中の2波長(λ_i, λ_j)を出力することができる。捕獲、出力された波長以外の光・電磁波は直線導波路中を導波する。また、本実施例では2チャンネルの波長分波器としているが、欠陥数を増やすことによって、よりマルチチャンネル化することも可能である。

【0034】図7は本発明の第3の実施の形態である、合分波器の概念を示している。ある波長帯域の光・電磁波31がフォトニック結晶導波路中を伝搬し、点欠陥32~34により捕獲され、面直方向に出力される。

【0035】この光・電磁波を点欠陥上に配置されている光・電磁波ファイバー35~37に取り込み、信号として用いる。このとき、光・電磁波ファイバーは、フォトニック結晶構造を乱さない程度の間隔をおいて、点欠陥上に配置されることが好ましい。

【0036】あるいは図8に示すように、光電変換機能を有する半導体素子、例えばフォトダイオードアレイ45~47と集積化することもできる。これにより、点欠陥42~44から面直方向に出力した光・電磁波を極めて小さな面積内で直接電気信号に変換することができる。

【0037】以下に、本発明の実施形態のフォトニック結晶導波路・波長分波器の作製方法について記述する。

【0038】まず、図9に示すように、例えばInP基板51上にバッファ層としてInP層52と、高屈折率スラブ材料として好ましくはInGaAsP層53を結晶成長させる。結晶成長は、好ましくはMOCVD法により、好ましくは590~650℃で行う。

【0039】続いて、図10に示すように三角格子状の円孔および点欠陥のパターンを形成するため、電子線描画用のフォトリソスト54を塗布し、図11に示すように露光、現像を行ってレジストをパターンニングする。フォトニック結晶の格子定数は、伝搬光・電磁波として赤外領域の波長を想定した場合にも0.5 μ m以下程度と非常に小さいため、ここでは電子線による描画を行っている。

【0040】次に、図12に示すようにレジストをマスクとしてRIE(Reactive Ion Etching)によりInGaAsPスラブに円柱孔と欠陥を形成する。RIEには、例えばH₂とCH₄の混合ガスを用いる。

【0041】次に、図13に示すようにレジスト除去後、スラブ上下を低屈折率の空気層とするため、図14に示すようにInGaAsPスラブをメンブレン化する。これは、InP層のみを選択的にエッチングするようにウェットエッチングして行う。

10 【0042】上記例では高屈折率スラブ材料としてInGaAsPを用いたが、Siも屈折率が高く、またマイクロマシーニングによる加工が可能であるので、有用な材料である。以下にSiをスラブ材料として用いた場合の作製方法について記述する。

【0043】まず、図15に示すようにSOI基板を用意する。SOI基板とはベースとなるSi基板61上にSiO₂層62を介して単結晶Si層63が積層されている基板である。また、これに換えてSi基板上にSiO₂層とSi層を成長させた基板を用いることも可能である。次に、図16に示すようにSOI基板61に電子線描画用のフォトリソスト64を塗布し、図17に示すように露光、現像を行ってレジストをパターンニングする。

20 【0044】続いて、図18に示すようにレジスト64をマスクとしてRIEによりSi層63に円柱孔と欠陥を形成する。RIEにはSF₆ガスを用いる。次いで、図19に示すようにレジストを除去した後、図20に示すようにHF水溶液によりフォトニック結晶下の酸化膜層をエッチングしてメンブレン化する。

30 【0045】

【実施例】以下、本発明の具体例について、特性を示す。まず、フォトニック結晶について記す。フォトニック結晶スラブはInGaAsPから構成し、例えば図21に示すようにフォトニック結晶の格子定数をaとして、穴の半径rは0.29a、スラブの厚さtは0.6a、とした。

40 【0046】これに対し、線状欠陥および点欠陥を設けた場合について、時間領域差分法(Finite Difference Time Domain:FDTD)により解析を行い、以下に示す結果を得た。なお、時間領域差分法とはマクスウェル方程式のうち時間に依存する回転方程式を直接解く方法であり、簡単に説明すると次のようになる。

【0047】等方的な媒質中ではマクスウェル方程式は次のように書かれる。

【0048】

【数1】

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = +\epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

【0049】ここで、 μ は透磁率、 E は誘電率、 C は導電率である。これらの式を差分化すると次の6つの式が得られる。

*【0050】
【数2】

*

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) = H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\mu\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right)} \left[\frac{E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k+1\right) - E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} + \frac{E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j+1, k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right] \quad (1)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) = H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right)} \left[\frac{E_z^n\left(i+1, j, k+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta x} + \frac{E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k+1\right)}{\Delta z} \right] \quad (2)$$

【0051】

【数3】

*【0052】
【数4】

$$\begin{aligned}
 & H_z^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \\
 &= H_z^n\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) + \frac{\Delta t}{\epsilon\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right)} \left[\frac{E_y^n\left(i+\frac{1}{2}, j+1, k\right) - E_y^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta y} + \frac{E_x^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) - E_x^n\left(i+1, j+\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta x} \right] \quad (3) \\
 & E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \\
 &= E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) + \frac{\Delta t}{\epsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)} \left[\frac{H_z^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y} + \frac{H_y^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

10

20

30

*

$$\begin{aligned}
 & E_x^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) \\
 &= E_x^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) + \frac{\Delta t}{\epsilon\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)} \left[\frac{H_z^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) - H_z^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z} + \frac{H_y^{n+1}\left(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_y^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} \right] \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & E_z^{n+1}\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) \\
 &= E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\epsilon\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)} \left[\frac{H_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1}\left(i-\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta x} + \frac{H_y^{n+1}\left(i, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

【0053】上の6つの式を用いてフォトニック結晶ス
ラブ内における光・電磁波の伝播の様子が解析できる。

50 こと、欠陥の上の電界を観測し、フーリエ変換するこ
とにより、その周波数スペクトルが求められる。

【0054】はじめに、1周期分円柱孔を除いた直線導波路について記す。規格化周波数 f が $0.27 \sim 0.28 [c/a]$ の範囲において、光・電磁波は導波路中をロスなく伝搬できる。格子定数 a は伝搬させたい光・電磁波の波長がこの条件を満たすように決められる。本実施例では伝搬光・電磁波の波長を $1.55 \mu m$ と設定し、 $0.27 \sim 0.28 [c/a]$ の中心である $f = 0.275 [c/a]$ を $1.55 \mu m$ として、 a を $0.275 \times 1.55 \mu m$ から求め、 $0.42625 \mu m$ とした。

【0055】図22に、導波路に隣接して設けた点欠陥から面直方向に放射される光・電磁波の周波数と強度の関係を示す。なお、点欠陥は一つの円柱孔の半径を変えて設けており、その半径は 0.56 とした。図から、規格化周波数 $f = 0.273 [c/a]$ の光・電磁波が上下方向に放射することが確認される。また、 Q 値はおおよそ 500 である。

【0056】図23に、図2に示した形態、すなわち直線導波路に隣接して異なる大きさの点欠陥を設けた形態における、各点欠陥からの放射光・電磁波の周波数と強度を示す。この場合の点欠陥は、半径がそれぞれ $0.56a$ および $0.58a$ の円柱孔とした。それぞれ周波数が $f = 0.2729 [c/a]$ および $f = 0.2769 [c/a]$ の光・電磁波が放射されることが確認される。また、欠陥の Q 値はいずれもおおよそ 500 である。

【0057】これらの結果から、2次元フォトリック結晶に点欠陥および線状欠陥の導入により形成した導波路が点欠陥からの光・電磁波取り出し／導入機能、および面出力型の波長分波・合波器としての機能を有することが確認された。

【0058】

【発明の効果】以上、本発明のように2次元フォトリック結晶導波路近傍に点欠陥を設けて形成した波長分波器では、2次元フォトリック結晶構造であるにも関わらず面直方向に光・電磁波を入出力することが可能であり、さらに、点欠陥から特定波長の光・電磁波を分波して入出力することができるので、超小型の波長分波器を実現することができる。これはまた、比較的容易な立体的超小型光・電磁波回路の実現を可能とするものである。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施形態である1つの点欠陥を有する2次元フォトリック結晶スラブ導波路を示す概略斜視図である。

【図2】本発明の一実施形態である2つの点欠陥を有する2次元フォトリック結晶スラブ導波路を示す概略斜視図である。

【図3】図1の2次元フォトリック結晶スラブ導波路の三角格子の様子を示した概略平面図である。

【図4】2次元フォトリック結晶スラブ導波路の正方格子の様子を示した概略平面図である。

【図5】点欠陥の他の形態を示す一部断面図である。

【図6】点欠陥の他の形態を示す一部断面図である。

【図7】本発明の面出力型波長分波器の形態を示す概略斜視図である。

【図8】本発明の面出力型波長分波器の形態を示す概略斜視図である。

【図9】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

10 【図10】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

【図11】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

【図12】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

【図13】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

【図14】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

20 【図15】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

【図16】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

【図17】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

【図18】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

【図19】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

30 【図20】本発明の2次元フォトリック結晶 $InGaAs$ スラブ導波路の製造工程を示した断面図である。

【図21】本発明に係る2次元フォトリック結晶の大きさを示す図である。

【図22】図1の2次元フォトリック結晶スラブ導波路に隣接して設けた点欠陥から面直方向に放射される光・電磁波の周波数と強度の関係を示したグラフである。

【図23】図2の2次元フォトリック結晶スラブ導波路に隣接して設けた2つの点欠陥から面直方向に放射される光・電磁波の周波数と強度の関係を示したグラフである。

40 【符号の説明】

- 1 1 スラブ
- 1 2 導波路
- 1 3 入射光（電磁波）
- 1 4 点欠陥
- 1 5 出力光（電磁波）
- 1 6 円柱孔
- 1 6 a 三角格子
- 1 6 b 正方格子
- 2 1 点欠陥
- 50 2 2 点欠陥

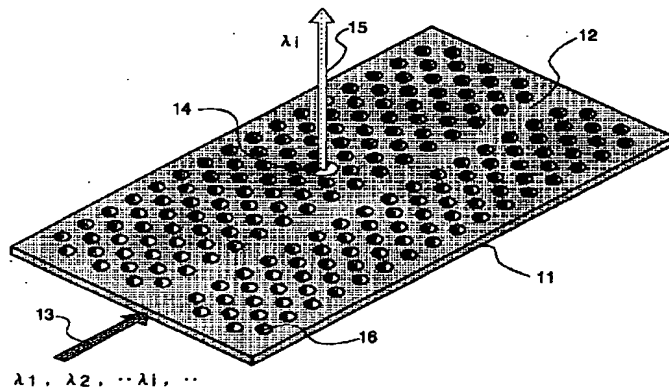
15

16

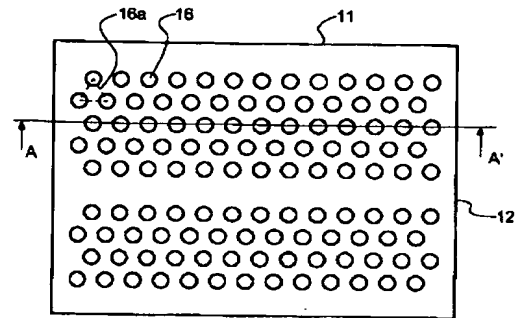
23 入射光
31 入射光
35~37 光ファイバー

* 41 入射光
45~47 光電変換素子
*

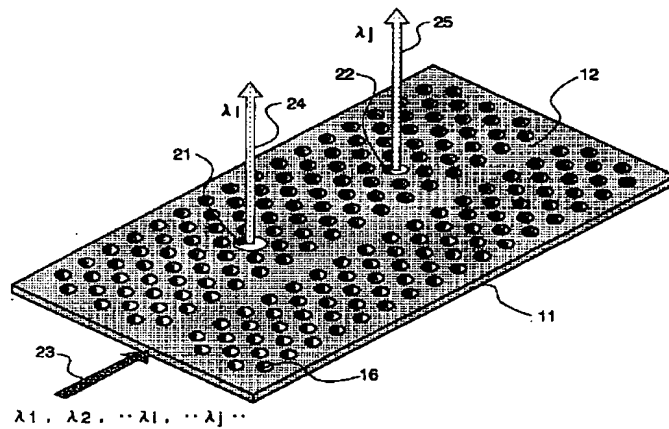
【図1】



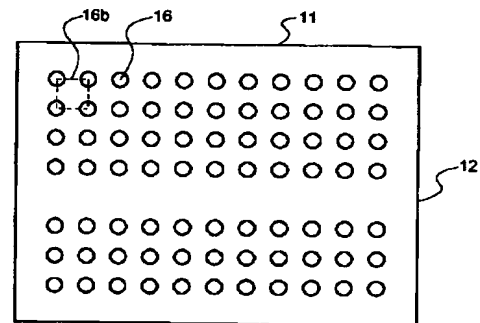
【図3】



【図2】



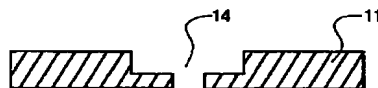
【図4】



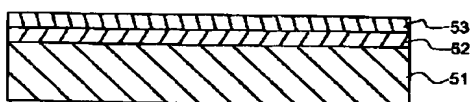
【図5】



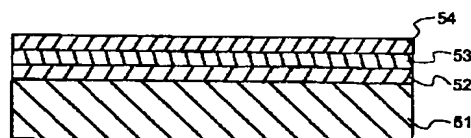
【図6】



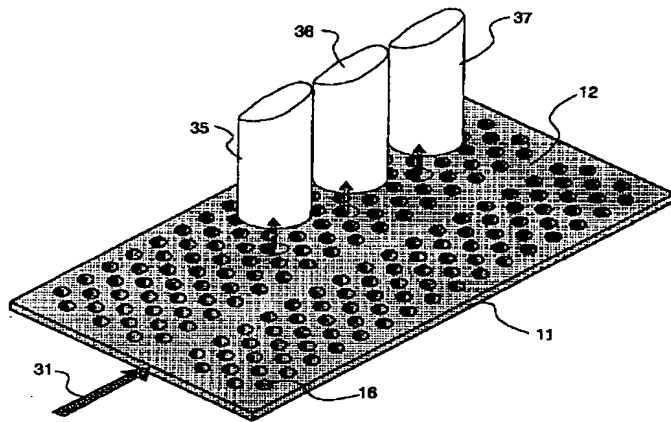
【図9】



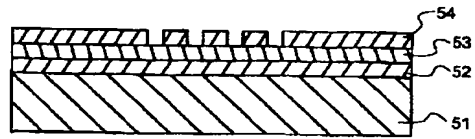
【図10】



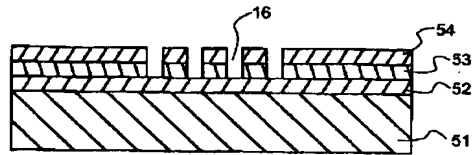
【図7】



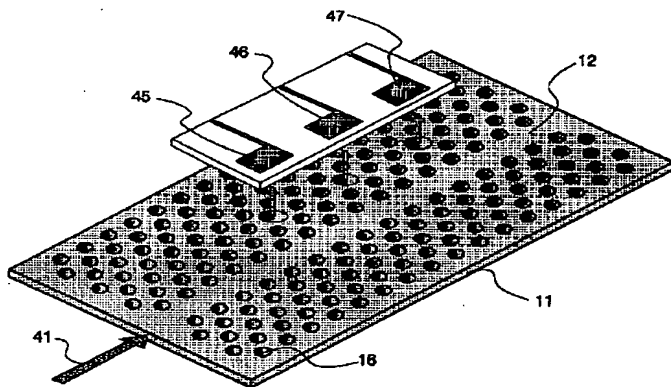
【図11】



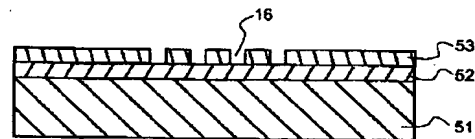
【図12】



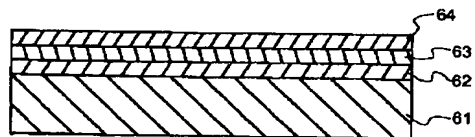
【図8】



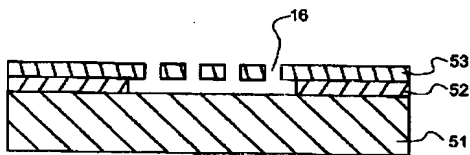
【図13】



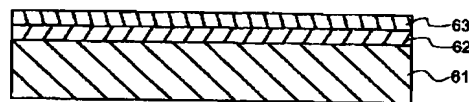
【図16】



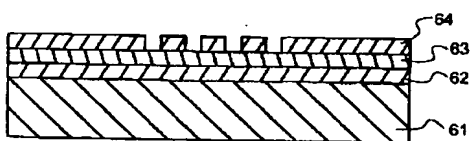
【図14】



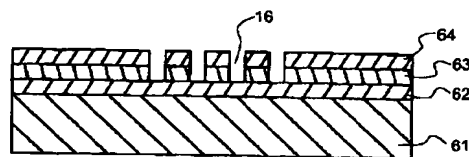
【図15】



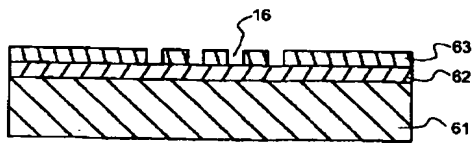
【図17】



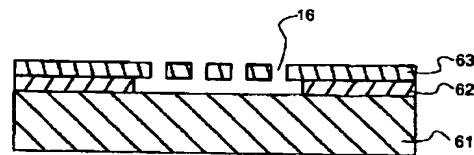
【図18】



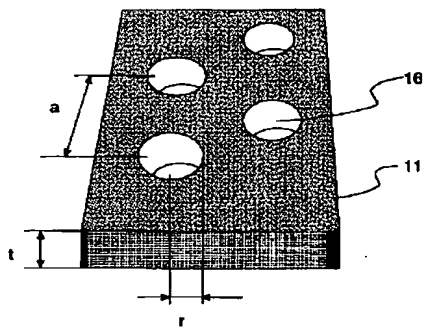
【図19】



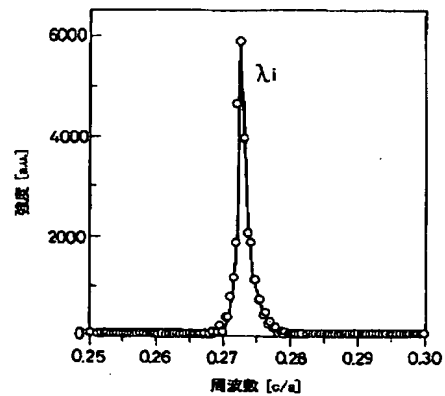
【図20】



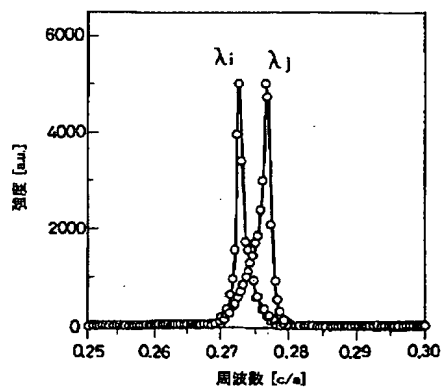
【図21】



【図22】



【図23】



フロントページの続き

(72)発明者 チュティナン アロンカーン
京都府中京区河原町通竹屋町上ル大文字町
232-403
(72)発明者 宮内 大助
東京都中央区日本橋一丁目13番1号 ティ
ーディーケイ株式会社内

(72)発明者 成宮 義和
東京都中央区日本橋一丁目13番1号 ティ
ーディーケイ株式会社内
Fターム(参考) 2H047 KA03 KB08 LA18 MA03 MA05
PA05 PA06 QA01 RA08 TA01

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☒ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.